

## Оптомеханическое связывание в системе «АСМ кантилевер – полупроводниковый лазер»

П.А. Алексеев, В.А. Шаров, М.С. Дунаевский

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Россия  
proxer@gmail.com*

При параллельной ориентации АСМ кантилевера и поверхности излучающего полупроводникового лазера система образует оптомеханический резонатор. В такой системе были исследованы оптомеханическое охлаждение и усиление в зависимости от материала и состава кантилевера, а также внешних условий.

### Optomechanical coupling between AFM cantilever and semiconductor laser

P.A. Alekseev, V.A. Sharov, M.S. Dunaevskii

*Ioffe Institute, 194021, Saint-Petersburg, Russia*

When an AFM cantilever oriented parallel to the surface of the emitting semiconductor laser, the system forms an optomechanical resonator. In such a system, optomechanical cooling and amplification were investigated depending on the material and a composition of the cantilever, as well as external conditions.

В последнее десятилетие активно развиваются исследования в области физических свойств и разработки приборов на базе оптомеханических резонаторов [1]. Оптомеханический резонатор представляет собой оптическую полость, границы которой имеют механическую степень свободы. Например, если в резонаторе Фабри-Перо, состоящем из двух зеркал, одно из зеркал закреплено на механической пружине, то он будет оптомеханическим. Действительно, при накачке такого резонатора оптическим излучением на подвижное зеркало будет действовать оптическая сила (давление или болометрический эффект), пропорциональная плотности оптической энергии запасённой в резонаторе. При смещении подвижного зеркала оптическая добротность резонатора будет уменьшаться. Изменение оптической добротности приведёт к уменьшению плотности оптической энергии в резонаторе и соответственно силы действующей на подвижное зеркало. Зеркало вернётся в первоначальное положение. Таким образом, происходит связывание степеней свободы оптического и механического резонатора.

Вследствие оптомеханического связывания, регулируя взаимное расположение зеркал, можно управлять эффективным коэффициентом жёсткости пружины, на которой закреплено подвижное зеркало, а также коэффициентом затухания колебаний зеркала. Таким образом, возможно либо демпфировать колебания зеркала («охлаждать»), либо усиливать колебания и переводить систему в состояние регенеративных осцилляций.

Коммерчески доступные АСМ кантилеверы стали одними из первых наномеханических резонаторов, на которых было продемонстрировано оптомеханическое охлаждение, которое позволило достигнуть снижения эффективной температуры зонда на три порядка [2]. При этом оптомеханическое связывание происходило за счёт теплового нагрева зонда. В качестве неподвижного зеркала можно использовать зеркало полупроводникового лазера. Целью данной работы было исследование свойств оптомеханического резонатора «АСМ кантилевер–полупроводниковый лазер» в зависимости от состава и материала зонда, а также внешних условий.

Исследования выполнялись на сканирующем зондовом микроскопе NTegra AURA (NT\_MDT) в атмосферных и вакуумных ( $10^{-5}$  Bar) условиях при комнатной температуре. Использовались зонды Si-PPP-FM (Nanosensors) и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – ORC8 (Bruker) с резонансной частотой  $\sim 70\text{kHz}$ . В качестве источника излучения использовался мощный (100 mW) GaAs/AlGaAs лазер, излучающий на длине волны 1.05  $\mu\text{m}$ .

Было установлено, что в системе «АСМ кантилевер – полупроводниковый лазер» возможно оптомеханическое связывание, как при атмосферном давлении (в условиях низкой механической добротности), так и в условиях вакуума. Было показано, что в условиях вакуума возможно «охладить»  $\text{Si}_3\text{N}_4$  зонд до температуры  $\sim 80\text{K}$  (Рис. 1). Si зонд охлаждался менее эффективно из-за более быстрого отвода тепла [3], и уменьшения болометрического эффекта необходимого для оптомеханического связывания.

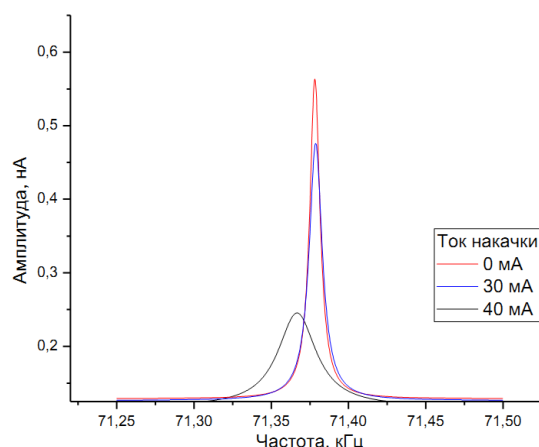


Рисунок 1. Амплитудно-частотная характеристика тепловых колебаний кантилевера при различных токах накачки лазера.

Ранее нами было показано, что при поглощении оптического излучения происходит сдвиг частоты и фазы колебаний АСМ зонда [4]. При параллельной ориентации поверхности излучающего лазера и кантилевера было обнаружено неоднородное распределение сдвига фазы колебаний вдоль кантилевера. При этом сканирование на разных резонансных частотах (1, 2, 3) выявило соответствие профиля сдвига фазы и профиля моды изгибных колебаний (Рис. 2).

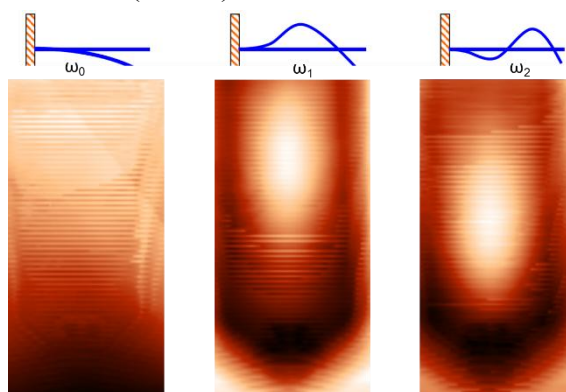


Рисунок 2. Распределение фазы колебаний при сканировании лазера на разных резонансных частотах.

Таким образом, при параллельной ориентации АСМ кантилевера и поверхности излучающего лазера возникает оптомеханическое связывание за счёт болометрического эффекта. Вследствие оптомеханического охлаждения температура  $\text{Si}_3\text{N}_4$  зонда была снижено до  $\sim 80\text{K}$ . Показана возможность картирования изгибных мод кантилевера на разных резонансных частотах.

Работа поддержана грантом Президента РФ МК-7001.2016.2.

1. M. Aspelmeyer, T. J. Kippenberg, F. Marquardt, *Rev. Mod. Phys.* **86**, 1391-1452 (2014).
2. C. H. Metzger and K. Karrai, *Nature* **432**, 1002-1005 (2004).
3. M. Dunaevskiy, P. Alekseev, et al., *Appl. Phys. Lett.* **106**, 171105 (2015).
4. M. Dunaevskiy, P. Alekseev, et al., *Appl. Phys. Lett.* **103**, 053120 (2013).